



MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO

OSCAR JAVIER BORDA GARCÍA

LAURA CAROLINA MENDOZA VALERO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BOGOTÁ D.C.

2019



MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO

OSCAR JAVIER BORDA GARCÍA

LAURA CAROLINA MENDOZA VALERO

Director: Edwin Francisco Forero García

Codirector: Jairo Alejandro Rodríguez Martínez

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BOGOTÁ D.C.

2019



Índice

Planteamiento del Problema	4
Objetivos	6
Objetivo General	6
Objetivos Específicos	6
Justificación	7
Marco Teórico	8
Modelo de un Material Piezoeléctrico.....	10
<i>Modelo Mecánico</i>	10
<i>Modelo Eléctrico</i>	11
Teoría de Modelado de sistemas	14
<i>Análisis de Respuesta en el Tiempo</i>	14
Diseño del Experimento y Desarrollo	19
Etapa descriptiva	19
Características de los Transductores	19
Metodología	21
Etapa experimental	23
Barrido en frecuencia	23
Simulación Barrido en Frecuencia (<i>Simulink</i>).....	25
Respuesta al Impulso	29
Desarrollo del Modelo Eléctrico Equivalente Propuesto	30
Pruebas de Impulso con los Transductores	31
Resultados	37
Impacto Social	39
Conclusiones	40
Apéndice	41
Bibliografía	49



Planteamiento del Problema

La energía es la capacidad de los sistemas para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismos o en su entorno [1]. En los últimos siglos, la revolución industrial y tecnológica, ha generado un creciente consumo de energía eléctrica que ha sido objeto de estudio y preocupación, ya que, en su mayoría, las fuentes de generación de energía eléctrica no son renovables, es decir, son finitas. [2]. De manera que el foco de estudio de esta investigación es un énfasis en una de las fuentes de generación de energía alternativa basada en el efecto piezoeléctrico, en el que se produce energía eléctrica a partir de la deformación o tensión mecánica aplicada en estos materiales [3].

Esta es una técnica novedosa de generación de electricidad, cuyas ventajas se centran en la resistencia ante la humedad y temperaturas altas, además de la maleabilidad que poseen materiales basados en este efecto. Por otra parte, estos materiales presentan relaciones de tipo causa-efecto [4] entre fenómenos mecánicos y eléctricos lo que hace que estos dependan tanto del campo eléctrico aplicado como de los esfuerzos mecánicos [5].

Dado que las fuentes de energía renovables no están presentes todo el tiempo como es el ejemplo de los paneles solares, los cuales durante la noche no suplirán energía, es pertinente diseñar un sistema que provea electricidad cuando el ambiente no sea capaz de generarla. Los sistemas basados en el efecto piezoeléctrico pueden generar energía eléctrica a partir de deformaciones mecánicas inducidas en estos materiales, los cuales no dependen del ambiente, es decir, la temperatura, radiación solar, humedad, etc., su funcionamiento radica en el efecto de una presión mecánica y el transductor realiza la transformación de esta en energía eléctrica.

Su funcionamiento radica en el efecto de una presión mecánica y el transductor realiza la transformación de esta en energía eléctrica. A diferencia de la generación eólica o solar, el fenómeno piezoeléctrico puede generarse a cualquier hora del día, obviando factores naturales como radiación solar o la energía cinética generada a través del viento. Esto necesita de un estudio adecuado de diferentes transductores piezoeléctricos, con diferentes formas, tamaños y materiales, en las que se obtengan salidas diferentes, todo con el fin de realizar un



modelo teórico para que las aplicaciones de estos lo tomen como referencia y lo apliquen a sus proyectos futuros, considerando los parámetros fundamentales del material piezoeléctrico. Solucionar problemas de esta índole es lo que se propone con la utilización de sistemas de energía renovable. Al realizar un estudio del efecto piezoeléctrico, se logró plantear un modelo matemático relacionando variables de entrada mecánicas y una respuesta eléctrica de salida. De manera que, a partir de estos resultados, se pueden diseñar sistemas de captación de energía no convencionales que respondan a la necesidad de otras alternativas de generación de energía.



Objetivos

Objetivo General

- Construir un modelo matemático de un transductor piezoeléctrico que permita modelar su respuesta al impulso.

Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar una metodología que permita realizar simulaciones con base a los parámetros del modelo y compararlas con los resultados experimentales.
- Realizar la comparación de distintos transductores piezoeléctricos para validar el modelo propuesto.



Justificación

La contaminación ambiental producida por las emisiones de dióxido de carbono provenientes del sector eléctrico, son generadas principalmente por plantas termoeléctricas. Esta investigación quiso, mediante la realización de un modelo matemático de un generador piezoeléctrico, hacer viable la aplicación de sistemas piezogeneradores que puedan mitigar el avance exponencial del deterioro de la capa de ozono, implementados en sistemas de energía renovable para que se puedan sustituir por este tipo de generación de energía que tienen efectos negativos a nivel ambiental.

Actualmente se proponen varios modelos de materiales piezoeléctricos, con el fin de que sean utilizados para el desarrollo de proyectos de energía alternativa. La piezoelectricidad también es un tipo de tecnología utilizada para la recolección de energía eléctrica a partir de presión mecánica, que se aprovecharía del caminar de las personas instalando sistemas con estos materiales en espacios públicos, donde se analice un tráfico abundante de personas y se logre captar una cantidad razonable de energía que alimente dispositivos eléctricos de baja potencia.

En la sociedad, la energía tiene el papel de mejorar la calidad de vida de quienes gozan con el acceso a ella. Las energías renovables causan demasiados juicios y polémicas por la falta de información, sobre todo por el tema de costos y la accesibilidad a ellas. Esta investigación tuvo de trasfondo profundizar con información verídica acerca de la obtención de energía limpia a partir de la vibración mecánica producida por nosotros mismos. Esto fue posible estudiar gracias a las pruebas realizadas con el uso de materiales basados en el efecto piezoeléctrico y que con ellos, se pudo obtener energía. El modelo matemático hallado fue la base para investigar el campo de acción de estos sensores y de cómo pueden ser utilizados a futuro en otros sistemas de captación de energía.



Marco Teórico

Los modelos matemáticos son pilares fundamentales para el estudio de diversos problemas en la actualidad y sustentar estudios de aplicaciones futuras. La descomposición de un fenómeno real físico en el que se consideran conceptos abstractos tales como: material, masa, energía, etc, se relacionan y se construyen expresiones numéricas.

En el caso específico de esta investigación, el objeto de estudio es el comportamiento de un transductor piezoeléctrico mediante impulsos mecánicos y su respuesta ante estos, para que, con un modelo matemático se logren predecir posibles situaciones de uso del transductor. La piezoelectricidad es un fenómeno que da cuando en su estructura cristalina hay una deformación debido a que es sometido a tensiones mecánicas y se obtiene una polarización eléctrica.

Los materiales piezoeléctricos se relacionan con dos ecuaciones asociadas a constantes de tensión piezoeléctrica que se mostrarán a continuación:

$$S_i = S_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_n = d_{nj} T_j + \varepsilon_{nm}^T E_m \quad (2)$$

$(m, n = 1, 2, 3 ; i, j = 1, 2)$

La ecuación 1 y 2 describen el fenómeno del efecto piezoeléctrico, donde \mathbf{d} es un tensor propio del material [6], \mathbf{S} es la deformación mecánica, \mathbf{D} es el desplazamiento eléctrico y estas variables son proporcionales a la presión aplicada \mathbf{T} y al campo eléctrico \mathbf{E} . [14]

Hay dos formas de describir el efecto piezoeléctrico: directo e inverso. El efecto directo se da cuando se obtiene una diferencia de potencial eléctrico a la salida, es decir, cuando el material se somete a alguna deformación mecánica como entrada.

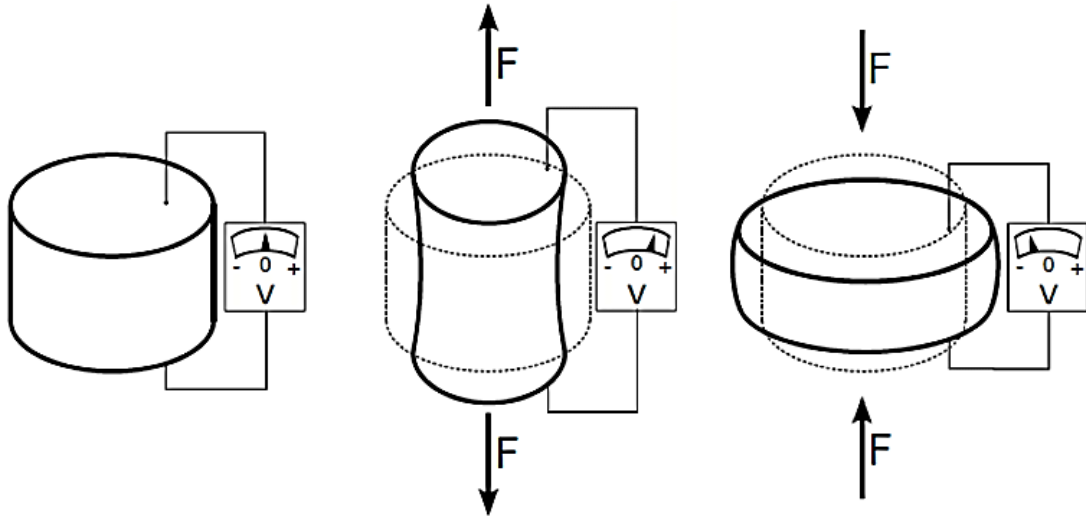


Figura (1) Esquema del efecto piezoeléctrico directo¹

La fuerza F aplicada al transductor, es directamente proporcional con el voltaje de salida. Según las especificaciones y características propias de fabricación, cada material piezoeléctrico entrega diferentes voltajes. En la figura 1 se observan 3 etapas (visualización de izquierda a derecha) del efecto piezoeléctrico directo, donde el voltímetro ilustrado cambia su valor dependiendo del movimiento oscilatorio que experimente el transductor.

El efecto piezoeléctrico inverso es cuando se aplica un campo eléctrico al transductor y este genera una deformación mecánica.

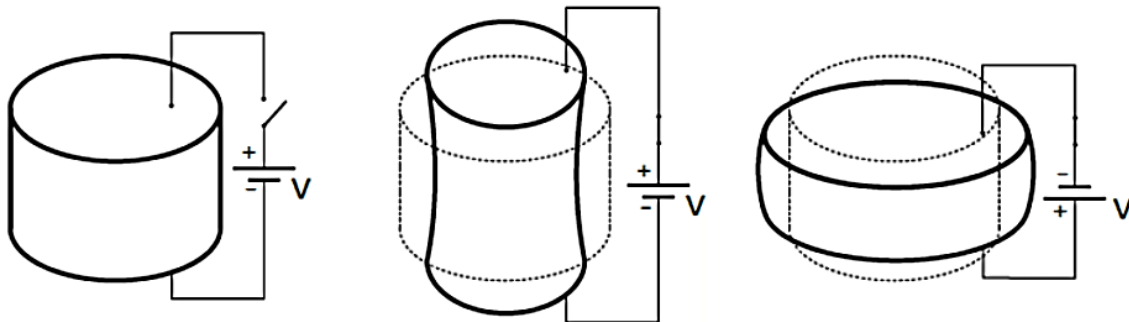


Figura (2) Esquema del efecto piezoeléctrico inverso

¹ Tomado del paper: “Diseño de microsensors piezoeléctricos mediante formulación robusta” - https://www.researchgate.net/publication/321084545_Diseño_de_microsensores_piezoeléctricos_mediante_formulación_robusta



La figura 2 describe que, al someter el transductor a un campo eléctrico, las fuerzas harán comprimir el cristal, generando un movimiento mecánico. [7]

Modelo de un Material Piezoeléctrico

Para describir el funcionamiento físico y eléctrico de un material piezoeléctrico, se plantean dos tipos de comportamientos que son el mecánico y el eléctrico.

Modelo Mecánico

Luego de describir la teoría de generar energía, la parte mecánica se propone como un sistema masa-resorte-amortiguador, en el que se evalúa el comportamiento del piezoeléctrico ante una fuerza de entrada:

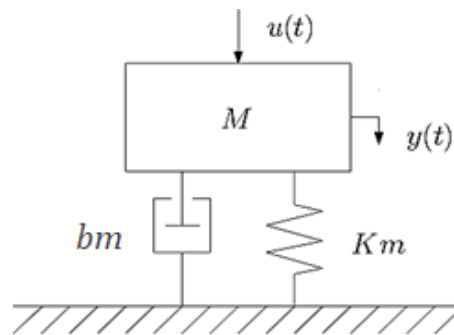


Figura (3) Esquema de modelo mecánico de un transductor piezoeléctrico [8]

La ecuación diferencial que relaciona el modelo mecánico es la siguiente:

$$m \ddot{y} + b\dot{y} + ky = u(t) \quad (3)$$

Con la figura (3) y el desarrollo de la función de transferencia del modelo mecánico, se establece una ecuación diferencial de segundo orden en la que m es la masa intrínseca en el transductor, b es la constante de viscosidad y k la constante de elasticidad. Las señales de entrada y salida del modelo $u(t)$ y $y(t)$ respectivamente, son las que se van a estudiar una vez se tengan las diferentes simulaciones y pruebas experimentales. [14]



Si bien $u(t)$ corresponde a la entrada del sistema, relacionada con la siguiente ecuación de movimiento dada por la acción de una fuerza externa dependiente del tiempo:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F(t) \quad (4)$$

Sin embargo, la investigación se enfatizó en el modelo eléctrico equivalente para consolidar el modelo matemático y realizar simulaciones utilizando programas con las herramientas adecuadas para analizar las conclusiones de los datos obtenidos como lo fueron Matlab, Wolfram Mathematica y PSIM.

Modelo Eléctrico

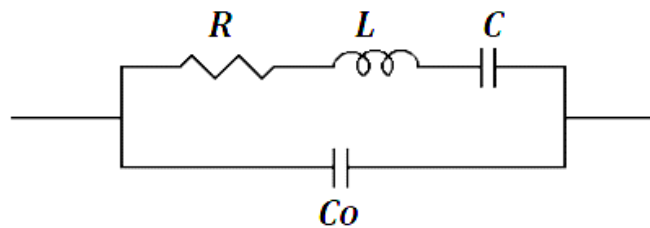


Figura (4) Modelo eléctrico equivalente de un transductor piezoeléctrico [9]

La figura (4) se utilizó tomando la referencia citada de la ecuación (5) y se tienen en cuenta las siguientes ecuaciones que, en el desarrollo de la investigación, se validarán haciendo la función de transferencia del circuito RLC serie. Esta hace referencia a una red en serie RLC que se conoce como "Motion Arm" o "Brazo en movimiento" [10]. Esta define el comportamiento eléctrico del cristal y en paralelo se encuentra una capacitancia C_0 , conocida como "capacitancia estática" o "Shunt" que es la suma de varias capacitancias parásitas debidas al propio encapsulado del cristal.

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{dV(t)}{dt} \quad (5)$$



La ecuación (5) es la función de transferencia del circuito *RLC* de la figura (4). *L* es la inductancia, *R* la resistencia, *C* es la capacitancia y *V* es la fuente de alimentación del circuito. [25]

$$Q = \frac{\omega_s}{\omega_+ - \omega_-} \quad (6)$$
$$Q = \frac{\omega_s L}{R - R_2}$$

La variable *Q* es el **factor de mérito** del circuito equivalente [25] que relaciona las variables de frecuencia de resonancia y antiresonancia (ω_s , ω_f) además de los parámetros del circuito eléctrico de la figura (4)

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$
$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C'} \right)}$$

Los transductores piezoeléctricos cuentan con un circuito equivalente *RLC* serie, que muestra el comportamiento “eléctrico” del transductor, ante un impulso mecánico. Los parámetros *R*, *L*, *C* y *C*₀, se hallan mediante pruebas de frecuencia e información previa del fabricante del material. Además, es clave tener estos parámetros presentes, ya que, en el momento de realizar simulaciones para validar el modelo, estos tienen que corresponder al modelo eléctrico del transductor más aproximado.

El comportamiento de los materiales piezoeléctricos deriva de los modelos mencionados anteriormente. Estas deformaciones mecánicas y generación de campo eléctrico provocan la aparición de una carga directamente proporcional a la deformación. [11]

$$q = \frac{k'}{e} x \quad (8)$$

Donde *q* es la carga producida por la deformación del cristal, *e* es el espesor del material, *x* es la deformación total producida y *k* es la constante dieléctrica del material.

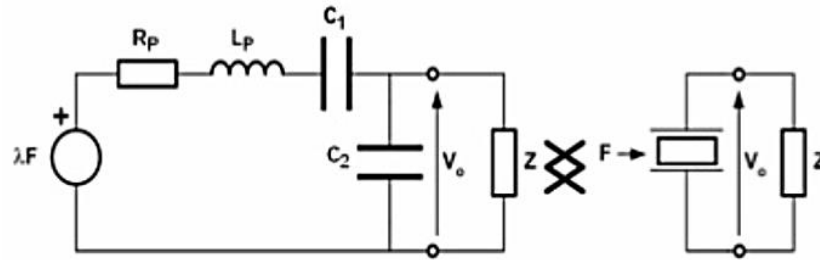


Figura (5) Circuito Equivalente Recolector Piezoeléctrico²

Realizando una consulta en toda la bibliografía encontrada, se encontraron varios modelos eléctricos equivalentes del transductor piezoeléctrico, sin embargo, se realizó la prueba de todos y el más acertado es el de la figura (5).

La fuente de entrada del circuito de la figura (5) λF es el voltaje de entrada que está directamente relacionado con la fuerza de entrada y un coeficiente λ como factor de conversión dimensional. [11]

$$V_0 = \lambda F \frac{C_p}{C_2} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 L_p C_p)^2 + \omega^2 R_p C_p}} \quad (9)$$

Con el fin de relacionar los parámetros mecánicos y eléctricos del comportamiento del sensor. Se realizan una serie de sustituciones para obtener la siguiente expresión:

$$V_0 = \frac{ke}{\varepsilon A} \frac{1}{\sqrt{(s - \omega^2 m)^2 + \omega^2 r^2}} F \quad (10)$$

ε corresponde a la permitividad dieléctrica absoluta del material, s el coeficiente elástico del material y r el coeficiente de rozamiento. En la figura (3) están expresados como $s = K$, $r = b$. Básicamente corresponde al mismo valor conceptual que se explicó en el apartado de la figura (3), pero en la bibliografía lo referencian diferente.

² Imagen tomada de la tesis “Conceptos Electrónicos en la Medida de la Aceleración y la Vibración” referenciado en la bibliografía



Sin embargo, para obtener los valores concretos de las variables de la ecuación (10), la permitividad eléctrica y otras variables que son dadas por el material, son complejas de conseguir si no se tiene una hoja técnica de los datos de fábrica del sensor.

Teoría de Modelado de sistemas

Análisis de Respuesta en el Tiempo

Las leyes básicas que controlan los circuitos eléctricos son las Leyes de Kirchhoff [12] Esta ley plantea que la suma algebraica de todas las corrientes que entran y salen de un nodo es cero. Los modelos matemáticos de un circuito eléctrico se pueden evaluar mediante la ecuación diferencial del circuito o también con la función de transferencia, que no es más que la transformada de Laplace de las ecuaciones diferenciales. [13]

En los análisis de respuesta transitoria y estacionaria, una vez se tenga claridad del modelo matemático de un sistema, existen varios métodos para el análisis del comportamiento de estos sistemas que son excitados con señales de entrada que regularmente son funciones escalón, rampa, parábola, impulso, etc. [12]

Un sistema de segundo orden es aquel que posee dos polos en su función de transferencia. Generalmente se pueden representar como se muestra en la ecuación (3).

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de primer orden u orden superior. En el caso de esta investigación, se tomará como referencia los sistemas de orden superior, ya que el circuito equivalente corresponde a un sistema con más de un elemento de almacenamiento, de manera que, al obtener una función de transferencia de estos circuitos, su resultado final, será uno de orden superior.

Las características de un sistema de control para una entrada escalón unitario son comúnmente las siguientes:

- Tiempo de retardo, t_d ; este tiempo es el tiempo que se toma la respuesta en alcanzar la mitad del valor final



- Tiempo de subida, t_r ; el tiempo de subida es el que se requiere para que la respuesta pase de 10 al 90%, de 5 a 95% o de 0 al 100% de su valor final. En el caso de este proyecto, se analizará un tiempo de subida de 0 a 100% ya que el sistema de análisis es uno subamortiguado.

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad (11)$$

Donde β se define en la siguiente figura:

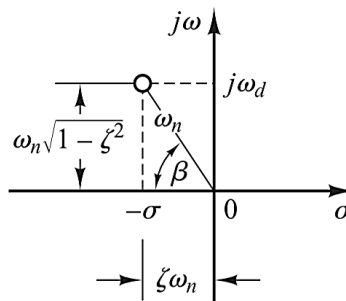


Figura (6) Definición del Ángulo β^3

- Tiempo de pico, t_p ; el tiempo pico es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobreelongación $\omega_d t_p = \pi$, por tanto:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (12)$$

- Sobreelongación, M_p ; la sobreelongación es el máximo valor en amplitud del pico de la curva de respuesta.
- Tiempo de asentamiento, t_s ; el tiempo de asentamiento se relaciona con el valor absoluto del valor final, por lo general es de 2 a 5% y que permanezca dentro de ese rango de porcentaje dado.⁴ Por lo general en la respuesta de los sistemas de segundo orden, el tiempo de asentamiento se define como:

³ Imagen tomada del libro “Ingeniería de Control Moderno” de Ogata, referenciado en la bibliografía

⁴ Toda la información sobre las características de los sistemas de control se sacó del libro: “Ingeniería de Control Moderno” de Ogata, referenciado en la bibliografía



$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (13)$$

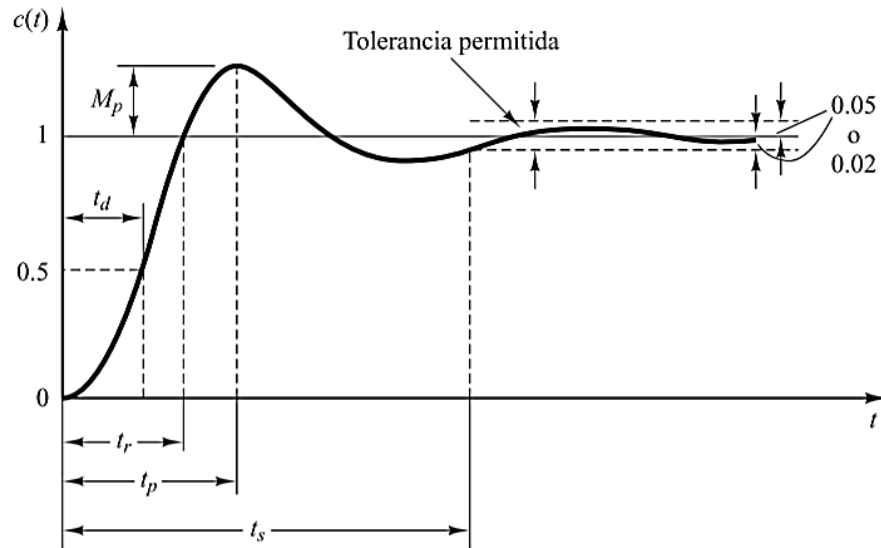


Figura (7) Curva de respuesta a escalón unitario con t_d , t_r , t_p , M_p y t_s .⁵

La respuesta de un sistema ante una entrada se puede modelar utilizando el dominio de la place en el tiempo, al observar la respuesta que tiene el sensor piezoeléctrico ante una entrada impulso se observa características que en relación al modelo de sistemas se puede caracterizar en una función de transferencia, observando, así como un sistema de este tipo posee polos de asentamiento y ceros de atenuación.

La caracterización del sensor piezoeléctrico tendrá como fin modelar a partir de la función de transferencia su comportamiento, para ellos se observa a continuación que análisis se podrá encontrar en una señal o sistema de segundo orden como lo es en este caso nuestro sistema.

Como se observó en lo anterior, la salida de un sistema ante una entrada se puede modelar a partir de su función de transferencia en el dominio de Laplace. De allí, se pueden describir algunas características que mostraran el comportamiento de la señal. Además, la señal de salida en un transductor piezoeléctrico tiende a tener una respuesta igual que la de un sistema

⁵ Imagen tomada del libro "Ingeniería de Control Moderno" de Ogata, referenciado en la bibliografía



de segundo orden, lo cual se estudiará en el desarrollo del documento. La señal del transductor y su frecuencia nos dará una clara idea de cómo se comporta el sistema y cómo, a partir de características como frecuencia y amplitud se plantea una ecuación en el dominio de Laplace y poder evaluar el modelo hallado.

Los sistemas de segundo orden se pueden describir de la siguiente forma:

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\zeta W_n \frac{dy(t)}{dt} + W_n^2 y(t) = K W_n^2 u(t)$$

Donde ζ es el factor de Amortiguamiento, W_n es la frecuencia natural del sistema, K es la ganancia $u(t)$ y $y(t)$ son las entradas y salidas del sistema respectivamente. Por lo tanto, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K W_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2}$$

La ecuación () genera un abre bocas de cómo a la salida de un sistema se puede describir la función de transferencia de un sistema de n orden⁶.

La relación que existe en comparación al modelo planteado en este trabajo se encuentra descrita de la siguiente manera:

La señal generada por el sensor piezoeléctrico ante un impacto de fuerza describe una frecuencia dominante en su sistema, vista a su vez en la transformada rápida de Fourier, por lo tanto, esa frecuencia se relaciona de la siguiente manera:

$$W_n^2 = \sqrt{\frac{C + C_0}{LC C_0}}$$
$$2 W_n \zeta = \frac{R}{L}$$

De igual manera, la relación se observa en el desarrollo de este trabajo, planteando el modelo circuital y su función de transferencia, para la caracterización del sensor piezoeléctrico.

⁶ El orden de un sistema lo definen las dinámicas de las ecuaciones diferenciales planteadas.



A su vez, cabe resaltar que, para el desarrollo de este proyecto, se realizó el análisis y utilización de las ecuaciones planteadas en relación a la caracterización de un sistema a partir de su respuesta en relación a su entrada, en este caso, un impulso.



Diseño del Experimento y Desarrollo

Etapa descriptiva

Como primera acción, se realizó un análisis de las características principales del comportamiento de un transductor piezoeléctrico, relacionando su funcionamiento mecánico y eléctrico. Además, se referenciaron las características de fábrica de los transductores a analizar.

Características de los Transductores

Para comenzar el análisis previo a las siguientes etapas, se va a detallar y a describir los transductores de objeto de estudio.

o *Transductor A*



Figura (8) Esquema con dimensiones de Transductor Piezoeléctrico #1



Tabla 1: Características de fábrica del material piezoeléctrico #1

Número de Modelo	AL36731359622
Tipo de transductor	Transductor piezoeléctrico de alto rendimiento (60W de potencia)
Tamaño	35 x 47x 45mm
Frecuencia de resonancia	40 kHz
Descripción	Transductor de resonancia homogénea con alto rendimiento, alta eficiencia de conversión y alta resistencia al calor.

Este sensor, provee características de alta eficiencia que, haciendo una serie de pruebas experimentales, se logró extraer la información necesaria para poder comparar con el modelo a realizar.

o ***Transductor B***



Figura (9) Imagen del Transductor Piezoeléctrico #2

- Tabla 2: Características de fábrica del material piezoeléctrico #2



Número de Modelo	CH-S42-50x2.6
Tipo de transductor	Cerámico piezoeléctrico ultrasónico
Tamaño	50 x 2.6mm
Frecuencia de resonancia	40 ± 1 kHz
Descripción	Transductor con buena estabilidad térmica y capacidad estática de consistencia fuerte. Máxima potencia generada: 35W

Metodología

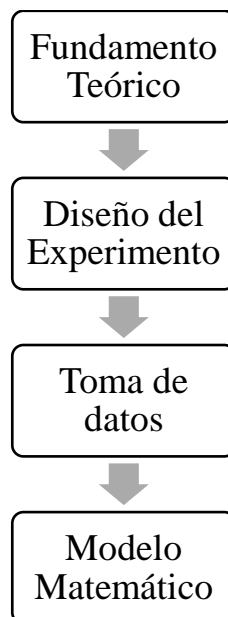


Figura (10) Diagrama del proceso de la metodología

En la metodología se describen 3 pasos principales con el fin de obtener el modelo matemático que serán detallados en la siguiente tabla (3):



- Tabla 3: Descripción de la Metodología Utilizada

<p>Fundamento Teórico</p>	<p>Antes de todo, evaluar el problema principal de esta investigación que es "<i>Construir un modelo matemático de un transductor piezoeléctrico que permita modelar su respuesta al impulso</i>", se consultaron los modelos existentes relacionados al comportamiento de un transductor piezoeléctrico. Allí se establecieron 2 modelos que caracterizaban el comportamiento: modelo mecánico y modelo eléctrico. Se conoce que un transductor piezoeléctrico responde a dos tipos de efectos (directo e inverso). En este caso en específico, se analizará el efecto directo, con una entrada mecánica (un impulso) y analizaremos la respuesta para establecer el modelo matemático. Cada uno de estos efectos, responde a un diagrama circuital o mecánico para relacionar las variables de entrada al sistema, junto con la parte intrínseca del material piezoeléctrico.</p> <p>La investigación se enfocó en analizar diferentes modelos circuitales que actualmente se han establecido y se tomó el que más se acercaba a la solución del problema. Al tener claro el circuito equivalente, se procedió a diseñar el experimento para probar la hipótesis.</p>		
<p>Diseño del Experimento</p>	<p>Estructura base</p>	<p>Se diseñó una estructura base, para colocar el transductor y los elementos de medida.</p>	
	<p>Sistema Generador de Pulsos</p>	<p>Para generar los pulsos, se programó un arduino mega, para que cada 0.5 segundos, enviara un pulso al relé y a su vez este activaba la electroválvula que iba conectada al módulo neumático y liberaba presión al pistón neumático, para que este golpeará el transductor repetidas veces.</p>	<p>Elementos del sistema:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Módulo neumático - Electroválvula - Pistón neumático - Relé - Arduino Mega
<p>Toma de datos</p>	<p>Después de accionar el sistema generador de pulsos, se procede a realizar la toma de datos por medio del osciloscopio y luego procesarla por Matlab</p>	<p>Osciloscopio</p>	<p>Cuando la señal de salida del transductor mostrada en el osciloscopio tenía la forma y las características que se necesitaban para analizar la información, se extraía la información en un archivo .csv</p>
		<p>Matlab</p>	<p>El archivo .csv, se lee y se procesa desde Matlab*. Acá, básicamente se extraen los dos vectores del osciloscopio (frecuencia y voltaje) mostrados en 2500 datos por cada uno de los vectores. Luego se filtra y se procesa para obtener los datos característicos y realizar el modelo matemático.</p>
<p>Modelo Matemático Obtenido</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se resuelve el circuito eléctrico propuesto, para relacionarlo con la teoría de modelado de sistemas. 2. Al finalizar todo el procesamiento de la información de la toma de datos, se graficó y se obtuvo los valores de la frecuencia de muestreo, el tiempo de asentamiento, frecuencias de resonancia y antiresonancia. 3. Se comparan las variables de la función de transferencia con las que se obtuvo en la toma de datos y se logra adquirir los valores del circuito equivalente. 4. Estos valores se reemplazan en el modelo matemático obtenido para observar su comportamiento. 		



Etapa experimental

Básicamente, en esta etapa se realizaron todas las pruebas experimentales relacionadas con los transductores. Se dividió en dos partes; para la primera, se realizó una prueba en frecuencia que está relacionada con el efecto piezoeléctrico directo y se recogió toda la información correspondiente a un barrido en frecuencia, para poder realizar análisis posteriores. La segunda se enfocó más en revisar la excitación por impulsos, tomando la señal de salida del transductor a partir de un impulso. Con esta señal de salida y con la referencia de las fórmulas de sistemas de control moderno citadas en el marco teórico, se realizó una función de transferencia, que después estuvo sujeta a una serie de análisis.

Barrido en frecuencia

Antes de analizar el circuito equivalente, se tuvo como base una serie de ecuaciones mostradas a continuación:

$$C = \frac{F_a^2 C_o - F_r^2 C_o}{F_r^2} \quad (14)$$

$$L = \frac{1}{C(2\pi F_r)^2} \quad (15)$$

$$C_o = \frac{1}{2\pi F_o I C_o} \quad (16)$$

Estas ecuaciones corresponden al análisis de la frecuencia de un material piezoeléctrico [14]. La frecuencia F_o , F_r y F_a se calculan analizando los gráficos de frecuencia procesados en un programa. En el caso de esta investigación se usó MATLAB como referencia para hacer el análisis de la información.

El barrido en frecuencia y la extracción de los parámetros del circuito equivalente del sensor se realizó basándose en el circuito equivalente que compone un material piezoeléctrico y una señal de entrada.

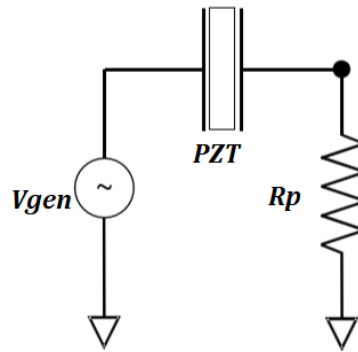


Figura (10) Circuito esquemático implementado en la realización del barrido en frecuencia

La resistencia R_p se usó de $1k\Omega$ y la referencia de fuente de entrada fue un generador Tektronix AFG1022. De esta manera, se midió el voltaje de la resistencia R_p del circuito de la figura (10) para graficar la relación de “Voltaje vs. Frecuencia”.

Para hacer el barrido en frecuencia se tuvo un aproximado de 300 datos variables de 1kHz a 60kHz. Los intervalos de frecuencia para la medida del voltaje se tomaron desde 1kHz hasta 38kHz con saltos de frecuencia de 0.25kHz. Llegando a 38kHz se observó una proximidad a la frecuencia de resonancia, de manera que los saltos de medida de frecuencia se tomaron más pequeños (0.1kHz) hasta el final de la frecuencia de anti-resonancia para darle más resolución al gráfico que se obtuvo.

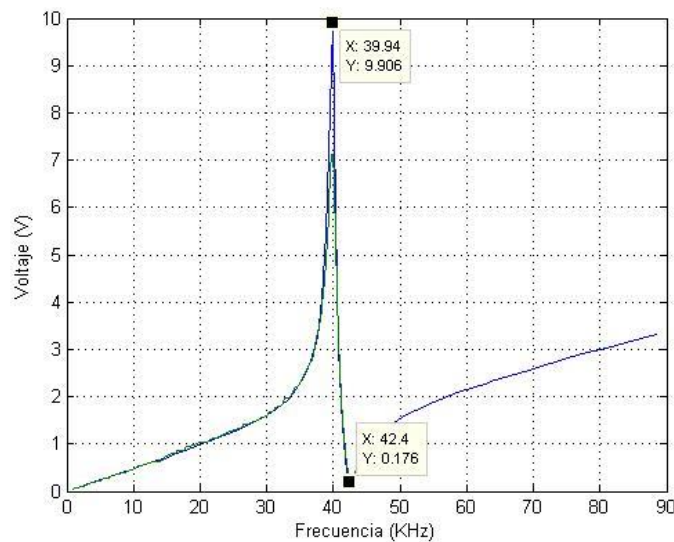


Figura (11) Caída de Potencial Medido en la Resistencia (R_p) en Serie con la Impedancia del Transductor

(Tomado de MATLAB 2014)



Se logró evidenciar en la figura (11), la frecuencia de resonancia (39.9KHz) y antiresonancia (42.4KHz), que responden a la variación de frecuencia del generador en el transductor.

Nótese que el gráfico presenta más frecuencias de resonancia a lo largo del experimento. Éstas no son relevantes para la toma de datos, ya que el transductor se comporta como un oscilador y la primera oscilación es la de mayor amplitud, y la más importante que se analiza.

La impedancia es un parámetro utilizado en la caracterización de los circuitos y componentes electrónicos. A partir de la respuesta en frecuencia del voltaje en el circuito, se calcula la impedancia de salida y de igual manera se gráfica, para observar y analizar su respuesta:

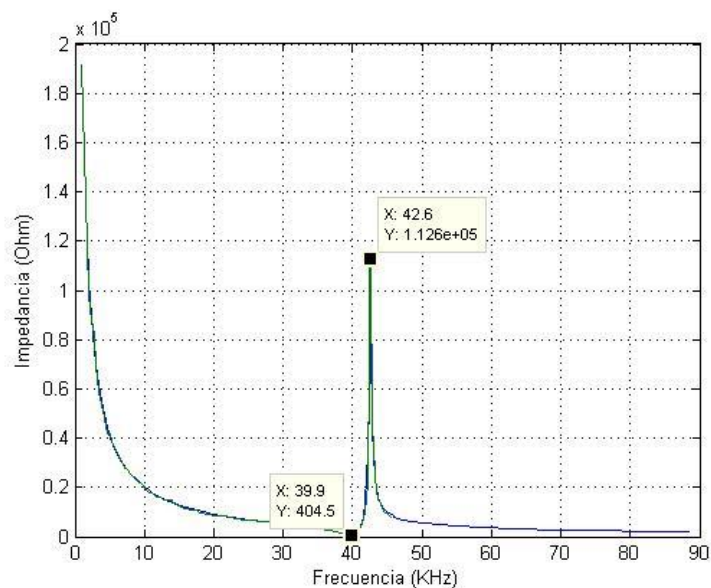


Figura (12) Gráfica de Impedancia del Transductor en Función de la Frecuencia (Tomado de MATLAB 2014)

El gráfico en el dominio de la frecuencia de la impedancia sirve para hallar los valores de los elementos del circuito equivalente del sensor piezoeléctrico, de igual manera se puede observar con claridad la frecuencia de resonancia descrita en 39.9KHz y la frecuencia de antiresonancia descrita en 42.6KHz al igual que respuesta del voltaje en relación con la frecuencia.

Simulación Barrido en Frecuencia (*Simulink*)

Para la simulación teórica en el dominio de la frecuencia, se tuvo en cuenta la función de transferencia obtenida del circuito equivalente teórico expresado en la figura (6).



$$G(s) = \frac{s^2CL + sCR + 1}{s^3CC_0L + s^2CC_0R + s(C + C_0)} \quad (17)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_p}{G(s) + R_p} \quad (18)$$

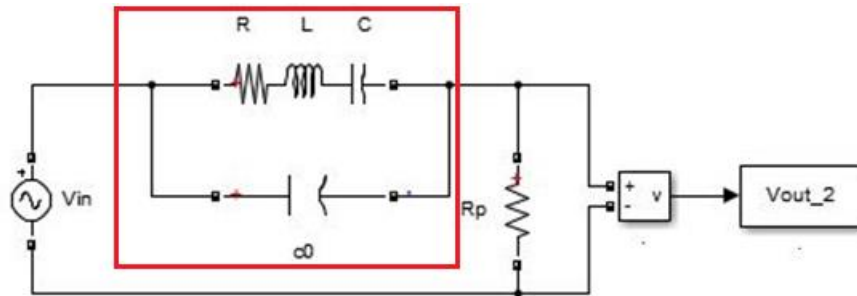


Figura (13) Circuito equivalente del transductor piezoeléctrico (Tomado de Simulink)

El circuito subrayado en la figura (13) corresponde al circuito de la figura (4), que se usó como base para las simulaciones del barrido en frecuencia realizado. Se colocó una resistencia R_p para medir la variación de voltaje respecto a la frecuencia.

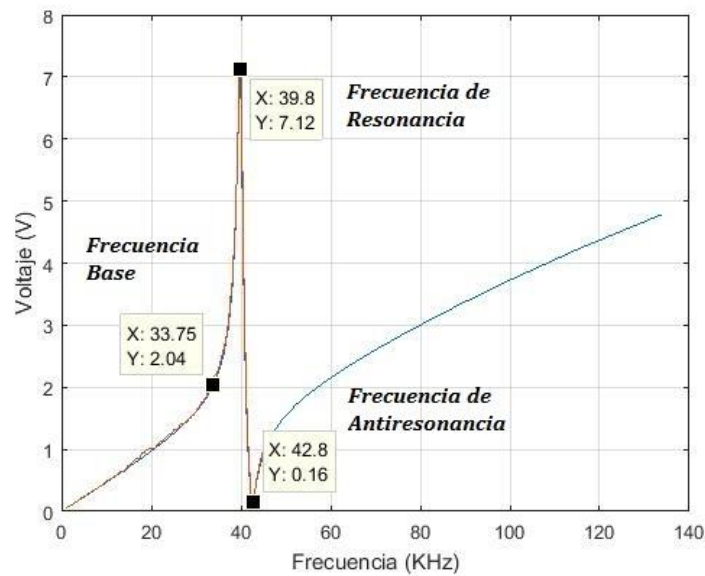


Figura (14) Circuito equivalente del transductor piezoeléctrico (Tomado de Matlab 2015)



En la figura (14) se seleccionan 3 frecuencias para analizar la simulación, con el objetivo de verificar el voltaje a la salida del sistema.

Tabla 4: Datos de las frecuencias tomadas de la prueba experimental

Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)
Frecuencia Base: 33.75KHz	2.04V
Frecuencia de Resonancia: 39.8KHz	7.12V
Frecuencia de Antiresonancia: 42.8KHz	0.16V

- **Frecuencia Base:**

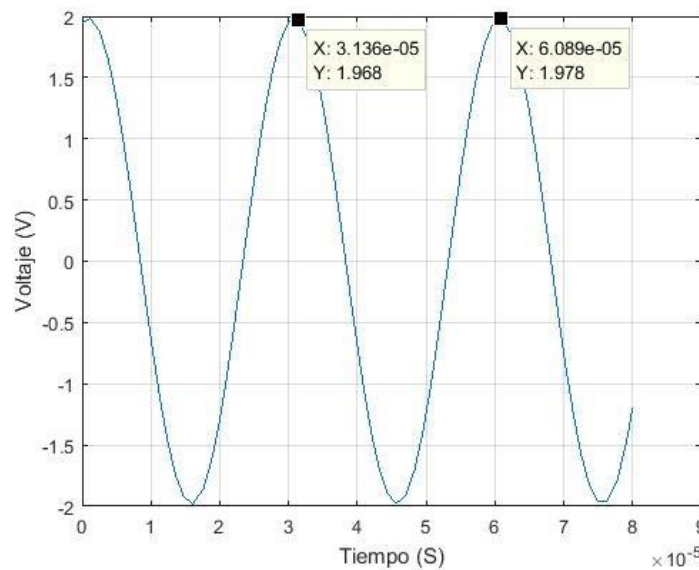


Figura (15) Salida del sistema eléctrico simulado con la frecuencia base: 33.75KHz (Tomado de Matlab 2015)

En la figura (15) se tomó la medida de un voltaje de 1.968V, relacionado con el dato de la tabla 3, se establece un error:

$$Error = \frac{Voltaje Experimental - Voltaje Simulado}{Voltaje Simulado} \times 100 = 3.65\% \quad (19)$$



- **Frecuencia de Resonancia:**

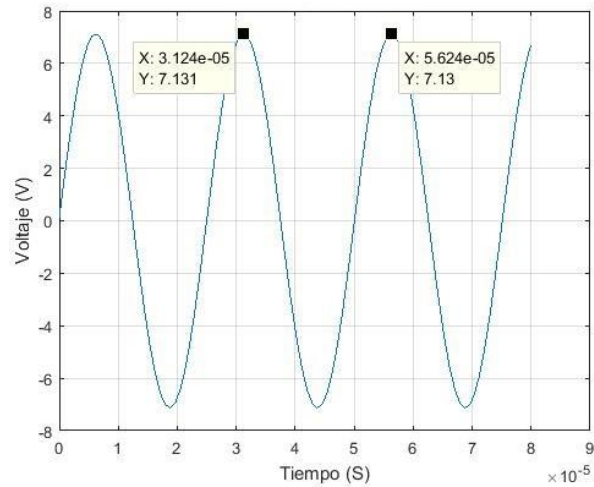


Figura (16) Salida del sistema eléctrico simulado con la frecuencia resonancia: 39.8KHz (Tomado de Matlab 2015)

En la figura (16) se tomó la medida de un voltaje de 7.13V, relacionado con el dato de la tabla 3, se estableció:

$$Error = 0.14\%$$

- **Frecuencia de Antiresonancia**

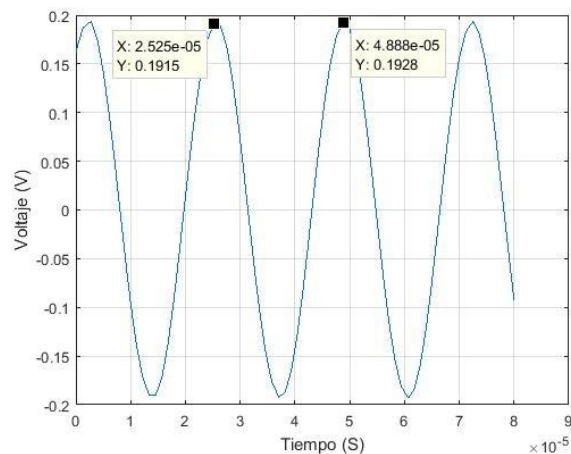


Figura (17) Salida del sistema eléctrico simulado con la frecuencia antiresonancia: 42.8KHz (Tomado de Matlab 2015)



Por último, se tomó el dato de voltaje de la figura (16) y se obtuvo:

$$Error = 1.6\%$$

Con estos datos, se llegó a la conclusión de que la simulación empata con errores de no más del 5% a la toma de datos experimentales con el barrido en frecuencia. De manera que las frecuencias obtenidas, son coherentes con la simulación del modelo eléctrico.

Del análisis de los gráficos del barrido en frecuencia, se obtuvo el valor de las frecuencias de resonancia, antiresonancia y la corriente del condensador⁷:

$$F_r = 39,99 \text{ KHz}$$

$$F_a = 42,55 \text{ KHz}$$

$$F_o = 2.94 \text{ KHz}$$

El valor de R se obtuvo analizando el pico negativo del gráfico de impedancia (Véase Figura 10) F_o se tomó de la figura (11), para obtener el valor de la impedancia de C_o . De la ecuación (8) que corresponde a la función de transferencia del circuito, se hallaron los valores internos del circuito equivalente es:

$$R = 404 \Omega$$

$$L = 0.18 \text{ H}$$

$$C = 90.1 \mu\text{F}$$

$$C_o = 656 \mu\text{F}$$

Respuesta al Impulso

El análisis del efecto piezoeléctrico directo se hizo con el fin de analizar a fondo la respuesta del transductor con un impacto de entrada y su comportamiento en su señal de salida. Para ello, se realizó un modelo eléctrico diferente al plantado en el barrido en frecuencia, para

⁷ Las ecuaciones de los valores obtenidos se encuentran referenciadas en el apéndice.



estudiar el transductor piezoeléctrico desde otra perspectiva. Se consideró este experimento como una buena práctica, ya que se tendrían dos puntos de vista diferentes y se detallaría cuál es más eficiente, si ambos son iguales o similares en su respuesta.

Desarrollo del Modelo Eléctrico Equivalente Propuesto

Inicialmente, se planteó, a partir de la señal generada por el sensor piezoeléctrico, el siguiente modelo eléctrico:

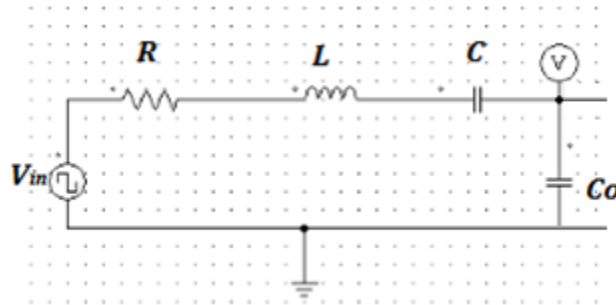


Figura (18) Esquema de modelo eléctrico en paralelo del transductor piezoeléctrico (Tomado de PSIM)

El circuito de la figura (18) se planteó con el fin de exponer una teoría que, basada en el circuito de la figura (4) y el barrido en frecuencia realizado, se logren obtener los parámetros y características que describan el sensor a partir de las pruebas experimentales con el impulso. Además, la base teórica para realizar la prueba de este circuito se muestra en la figura (5). Se observa que, entre las terminales del sensor, está el condensador C_0 y a su vez el circuito RLC en serie con la fuente V_{in} que describe la parte **mecánica** del sensor. La función de transferencia que describe el anterior modelo planteado es la siguiente:

$$V_{in} \frac{s C}{(s^3 L C C_0 + s^2 R C C_0 + s(C_0 + C))} = V_{out} \quad (20)$$

V_{in} corresponde al valor de entrada del circuito simulado con un pulso como se muestra en la figura (18) y V_{out} corresponde a la salida del circuito o bien, la respuesta al impulso. Para validar este modelo eléctrico, se simuló con los valores hallados en el barrido en frecuencia y se obtuvo la siguiente respuesta:

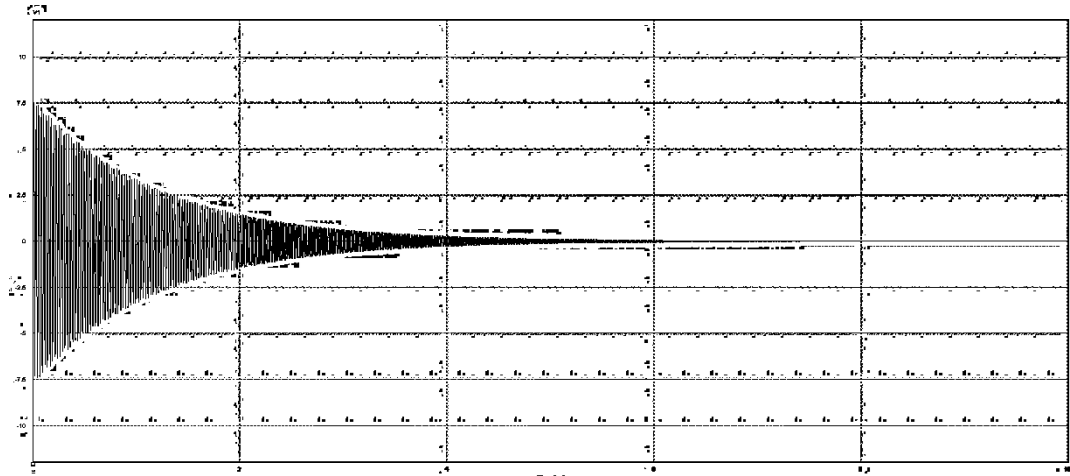


Figura (19) Respuesta al impulso del modelo circuital propuesto (Tomado de PSIM)

Nótese que la respuesta tiende a comportarse como un sistema de segundo orden. Para verificar la frecuencia de resonancia, se realizó la transformada rápida de Fourier de la señal de salida del circuito:

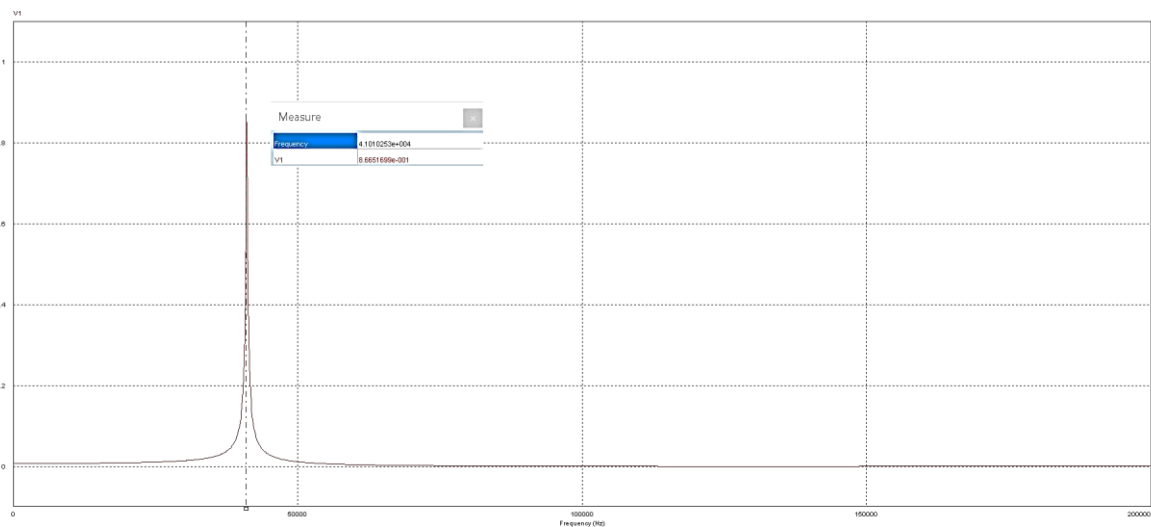


Figura (20) Transformada Rápida de Fourier del Circuito de la Figura (18) (Tomado de PSIM)

La frecuencia con más relevancia que se muestra en la figura (20) es la frecuencia de antiresonancia $F_r=41.02KHz$. Sin embargo, el propósito de realizar esta prueba, es comprobar que el circuito propuesto corresponde al comportamiento del transductor piezoeléctrico y sus valores de frecuencia, amplitud y tiempo de asentamiento, también evidencia el comportamiento esperado.



Pruebas de Impulso con los Transductores

En esta sección, se describirán cada uno de los procesos realizados para la toma de datos de los transductores. Se realizaron varias pruebas para poder obtener un análisis más detallado y preciso de los transductores.

A partir de una fuerza de entrada se realizaron las pruebas y utilizando la estructura mostrada en la figura (21). El pistón neumático golpeaba los transductores, de manera que, en un osciloscopio, se obtuvieran los datos de la respuesta del material piezoeléctrico al impulso.

Para esto, se establecieron diferentes fuerzas (N), medidas previamente con la celda de carga, que sirvieron para establecer la entrada del sistema.



Figura (21) Foto del montaje del experimento (Foto tomada Laboratorio ETM 5, *Universidad Santo Tomás*)

Con ayuda de una conmutación a una electroválvula, se logró dar el impulso de fuerza que tuvo el sistema a la entrada. Esto simuló el impulso sobre el transductor.



Prueba Transductor A

Para el desarrollo de las pruebas, el primer paso es encontrar la frecuencia de resonancia. Se puede hallar de varias formas. En la etapa teórica se tuvo en cuenta el barrido en frecuencia. Pero, para darle validez al modelo, se tuvo en cuenta otra manera de obtención de los datos, en la que se hallaría la frecuencia de resonancia con la señal de salida del transductor.

El objetivo de esta prueba es llegar a la señal envolvente de la respuesta del transductor frente al impulso aplicado y validar las frecuencias de resonancia y antiresonancia utilizando la teoría de control citada en el marco teórico del documento.

El piezoeléctrico, dentro de sus especificaciones técnicas, muestra que su frecuencia de resonancia es de 40Khz, los pasos para realizar la toma de datos experimentales sobre la salida del sensor piezoeléctrico son los siguientes:

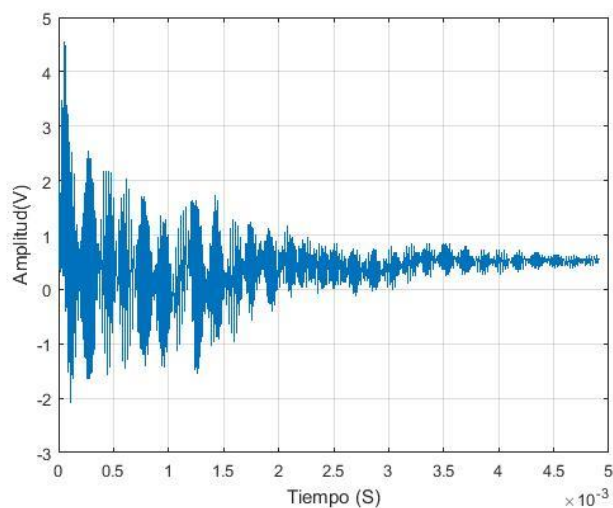


Figura (22) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A (Tomado de Matlab 2015)

Se notó en la señal de salida que tiene un nivel DC en su respuesta, de manera que, mediante un procesamiento de la señal realizando un filtro digital, se quita el nivel DC de esta y el ruido que la acompaña.

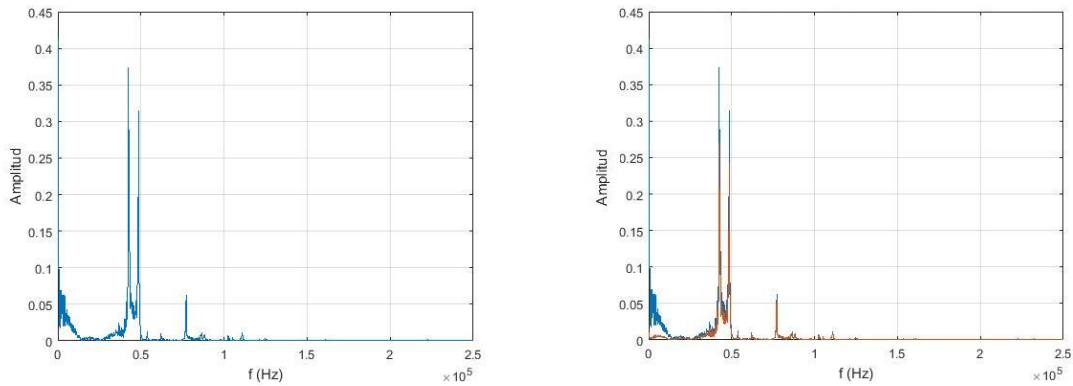


Figura (23) Transformada Rápida de Fourier de los Datos del Transductor A (Tomado de Matlab 2015)

Mediante este filtro, logramos determinar picos representativos de frecuencias, en los que, logramos concluir, que se encuentran las frecuencias de resonancia y antiresonancia.

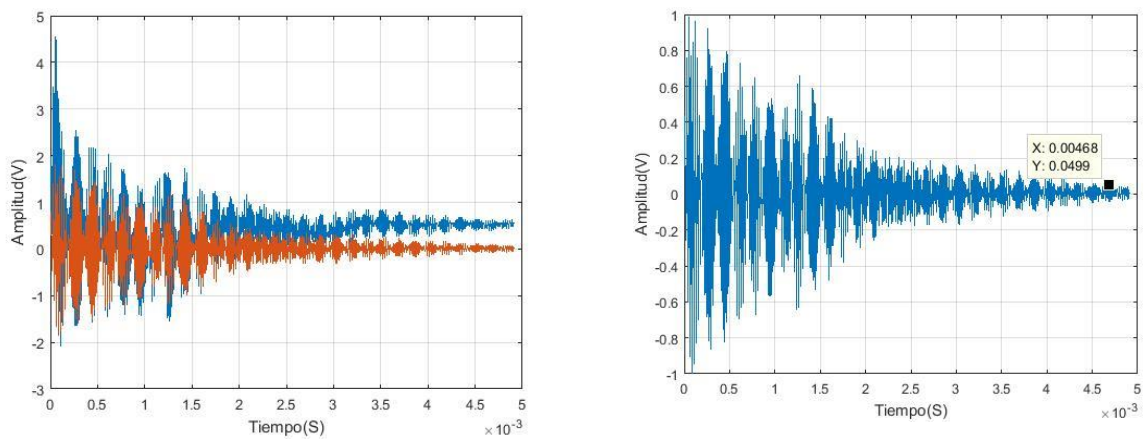


Figura (24) Señal de salida original y la filtrada sin el nivel DC

Se observa que la frecuencia de oscilación es la misma frecuencia de antiresonancia del transductor piezoeléctrico. Se concluyó, además, que entre mayor es la frecuencia de muestreo, se podrá observar la señal envolvente que contiene el potencial eléctrico generado por el transductor.

$$t_s = 0.0046s$$

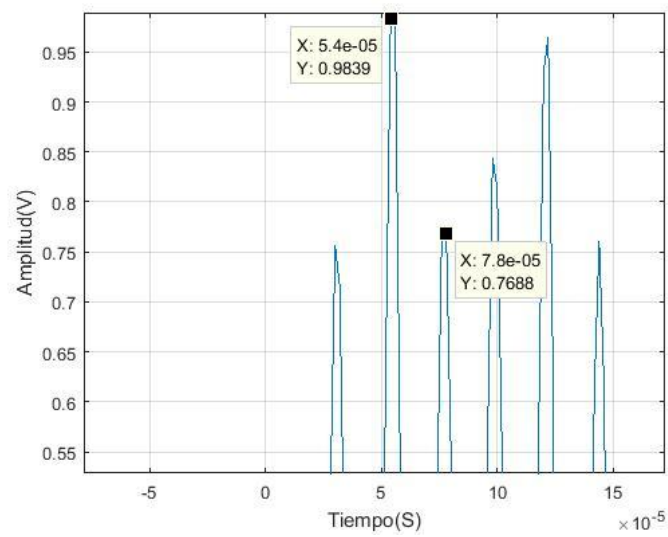


Figura (25) Señal de Salida haciendo énfasis en la diferencia de las frecuencias

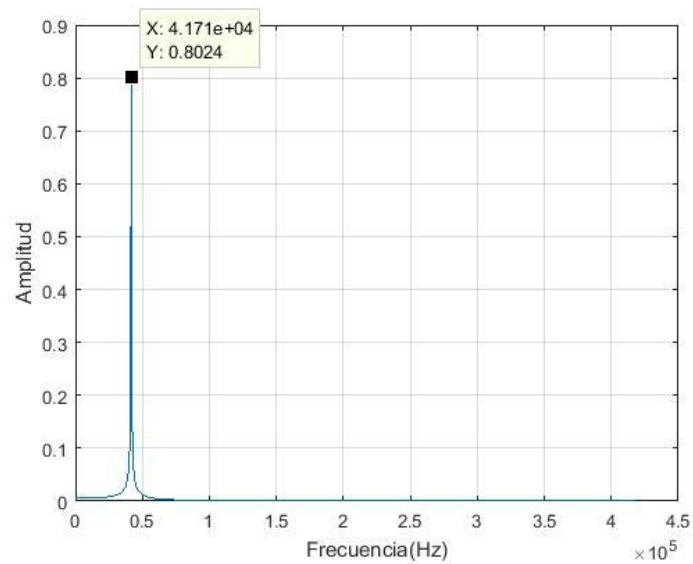


Figura (26) Transformada Rápida de Fourier del Modelo Matemático

La frecuencia evidenciada realizando la FFT del modelo matemático hallado es de 41.7kHz, lo cual describe que la frecuencia dominante del sistema es la frecuencia de resonancia y concuerda con el dato medido.



Se realizaron las mismas pruebas experimentales con 3 transductores más (4 en total) para verificar el modelo matemático hallado.⁸

Con la ecuación (14) y estableciendo un sistema de 4 ecuaciones y 4 incógnitas, relacionando los parámetros del circuito equivalente con las frecuencias de resonancia y los criterios de control añadidos, se hallaron los siguientes valores de R, L, C, C_0 :

$$R = 1\Omega$$

$$C = 26.3 \text{ nF}$$

$$C_0 = 311 \text{ nF}$$

$$L = 600 \mu\text{H}$$

Se observó que los valores cambian respecto al análisis del barrido en frecuencia, pero el factor característico de ese experimento es el voltaje de entrada del generador (10V). Si este varía, los valores del circuito eléctrico también cambian, cosa que no pasa con las pruebas con el impulso.

Tabla 5: Datos de las frecuencias tomadas de la prueba experimental

Pruebas Impulso	
Transductor A #2	Transductor A #3
$T_s = 0.004257$	$T_s = 0.003965$
$R = 1\Omega$	$R = 1\Omega$
$C = 27.2 \text{ nF}$	$C = 26.39 \mu\text{F}$
$C_0 = 321 \text{ nF}$	$C_0 = 317 \mu\text{F}$
$L = 579 \mu\text{H}$	$L = 560 \text{ mH}$

Se hallaron los valores de los otros sensores mostrados en la tabla 4, que no variaban mucho, ya que, el tiempo de asentamiento t_s no variaba demasiado debido a que eran transductores del mismo tipo.

⁸ En el apéndice del documento, se encuentran las gráficas de los otros transductores estudiados.



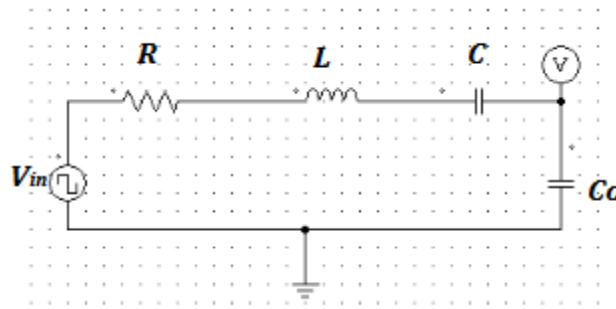
Resultados

Uno de los propósitos de esta investigación, fue evaluar modelos matemáticos existentes de transductores piezoeléctricos. Analizar la forma de encontrar los parámetros intrínsecos del piezoeléctrico, para que se logren implementar en futuras aplicaciones con énfasis en la generación de energía renovable.

Después de llevar a cabo toda la metodología propuesta, se logró constatar el siguiente modelo matemático:

$$V_{in} \frac{s C}{(s^3 L C C_0 + s^2 R C C_0 + s(C_0 + C))} = V_{out}$$

Tomando como referencia el circuito eléctrico de la figura (18)



De esta evaluación, se tomó la prueba del barrido en frecuencia [3] y se obtuvo un primer acercamiento de los parámetros del transductor. Este modelo es más complejo a la hora de extraer los datos, ya que utiliza la metodología de hallar las frecuencias de resonancia y antiresonancia por medio de una señal de entrada. Una vez se hayan tomado los datos suficientes para hallar los valores de estas frecuencias, se utilizan una serie de fórmulas para obtener los parámetros del circuito equivalente. Pero este método no analiza la fuerza de entrada al transductor ni su evaluación previa a un modelo mecánico.

$$R = 404 \Omega$$

$$L = 0.18H$$

$$C = 90.1 \rho F$$

$$C_0 = 656 \rho F$$



Con el fin de relacionar más variables de entrada y comparar los datos del primer experimento, se planteó una metodología diferente, en la que se logró visualizar el impacto de entrada al transductor y su respuesta característica. Para obtener los valores de los parámetros del circuito equivalente del piezoelectrico se analizó la frecuencia de la señal envolvente y a partir de ese dato, se estableció, con la solución del circuito equivalente, las ecuaciones particulares para obtener los parámetros del sensor.

Tabla 6: Comparación de los parámetros de los dos transductores piezoelectricos

Resultados Pruebas		
Transductor A #1	Transductor A #2	Transductor A #3
$T_s = 0.0046s$	$T_s = 0.0042s$	$T_s = 0.0039s$
$R = 1\Omega$ $C = 26.3 nF$ $C_0 = 311nF$ $L = 600\mu H$	$R = 1\Omega$ $C = 27.2 nF$ $C_0 = 321nF$ $L = 579\mu H$	$R = 1\Omega$ $C = 26.39 \mu F$ $C_0 = 317\mu F$ $L = 560mH$
Transductor B		
$T_s = 0.004064$		
$R = 1\Omega$ $C = 12.41 \mu F$ $C_0 = 19.84\mu F$ $L = 0.51mH$		

Del transductor A tomamos varias pruebas con diferentes transductores del mismo tipo, en las que el valor de t_s tendió a ser el mismo, de manera que los valores de los parámetros del circuito eléctrico equivalente tendrían a ser los mismos. Del transductor B fue más complejo el análisis y toma de datos. Su capacidad de resistencia física no es muy buena y la generación de potencial eléctrico a la salida no es tan eficiente como el transductor A, sin embargo, se adaptó al modelo matemático.



Impacto Social

La investigación realizada, tuvo como fin principal encontrar un modelo matemático, que describa el comportamiento de transductores piezoeléctricos con respuesta de un impulso. Las aplicaciones de los resultados obtenidos en este trabajo son proyectadas a sistemas de energías renovables, ya que estos materiales tienen la capacidad de generar energía limpia, que describan movimientos relacionados con impulsos. Los pasos de las personas o mecanismos que generen impulsos repetitivos son ejemplos de las posibles formas de obtener la fuerza necesaria, para generar energía a través de estos materiales.

Estos sistemas innovadores, generadores de energía limpia, hasta ahora se están implementando y han mostrado una respuesta aceptable ante el esquema social, ya que, además de reducir el impacto ambiental estimulado por las energías convencionales, reducen costos.



Conclusiones

Debido a la alta demanda energética de hoy en día, plantear formas de obtención de energía generada por otras fuentes no convencionales y amigables con el medio ambiente, son el principio de una nueva generación de sistemas energéticos. El resultado de esta investigación fue satisfactorio, ya que, se pueden diseñar más sistemas de recolección de energía con el transductor estudiado y con otros materiales piezoeléctricos.

A partir de la señal de salida de un sistema, se puede caracterizar una ecuación, de tal manera que describa su comportamiento. En el caso del sensor piezoeléctrico, la señal de salida frente al impacto de fuerza fue descrita por las diferentes frecuencias intrínsecas del sensor y gracias a ello, se logra componer una función de transferencia que describa el comportamiento del sensor.

Es importante evaluar la información mostrada en investigaciones previas, para lograr tener una aproximación de los datos y tomar decisiones a la hora de implementar nuevos modelos.

Los dos transductores analizados, responden a características diferentes, debido a los materiales de realización de cada uno. El Transductor A, es de potencia alta (60W) y los datos tomados, generaron menor ruido que el transductor cerámico (Transductor B). Cada uno genera diferente potencial de energía, pero se validó con el modelo matemático, que se pueden obtener los datos de los parámetros del circuito eléctrico equivalente, independientemente del material del transductor piezoeléctrico.

Las ecuaciones matemáticas propuestas describen, a partir de diferentes parámetros hallados en la salida del sensor, un modelo el cual permite dar una idea de cuáles son los valores de los elementos eléctricos intrínsecos del sensor. Estos valores varían según la precisión de la toma de los datos como se observó al calcular el error respecto al modelo del barrido en frecuencia.



Apéndice

1. Fórmulas de los datos del barrido en frecuencia

$$L = \frac{1}{C (F_r 2\pi)^2} \quad (1)$$

$$C = \frac{F_a^2 C_0 - F_r^2 C_0}{F_r^2} \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{1}{2\pi F} \quad (3)$$

Donde F_r es la frecuencia de resonancia, F_a es la frecuencia de antiresonancia, C es el condensador del circuito equivalente del transductor, F_0 es el valor de frecuencia tomado para hallar la resistencia R y L es la inductancia del circuito equivalente.

2. Fórmulas de Control Aplicadas

$$\omega_d = \sqrt{\frac{C + C_0}{L C C_0}} \frac{1}{2\pi} \quad (1)$$

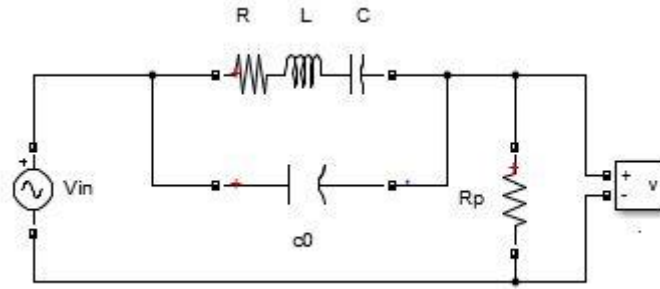
$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{L C_0}} \frac{1}{2\pi} \quad (2)$$

$$\omega_n = \omega_d \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3)$$

$$\omega_n = \frac{R}{2\pi L} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{4}{t_s \omega_n} \quad (5)$$

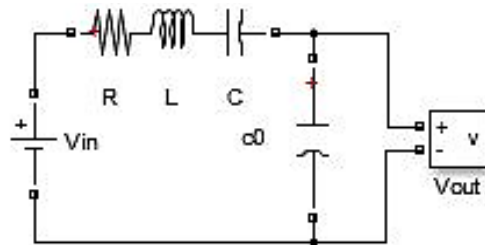
2. Solución Función de Transferencia del Circuito de la figura (9)



$$\frac{1}{C_s} + Ls + R = \frac{CLs^2 + CRs + 1}{C_s} \quad (6)$$

$$\frac{\frac{s^2CL + CRs + 1}{C_s} \frac{1}{C_0}}{\frac{s^2CL + CRs + 1}{C_s} + \frac{1}{C_0}} = \frac{CLs^2 + CRs + 1}{CC_0Ls^3 + CC_0Rs^2 + (C + C_0)s} \quad (7)$$

3. Solución Función de Transferencia Circuito Eléctrico Propuesto



$$\frac{1}{sC} + sL + R \quad (8)$$

$$\frac{\frac{1}{sC_0}}{\frac{s^2LC + sRC + 1}{sC} + \frac{1}{sC_0}} \quad (9)$$

$$\frac{\frac{1}{sC_0}}{\frac{s^3LC + s^2RC + s(C_0 + C)}{s^2CC_0}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (10)$$

$$\frac{s^2CC_0}{sC_0(s^3LC + s^2RC + s(C_0 + C))} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (11)$$

$$\frac{s^2CC_0}{(s^3LC C_0 + s^2RC C_0 + s(C_0 + C))} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (12)$$

4. Parámetro t_s se obtiene de la siguiente ecuación:



$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\left(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)$$

Las curvas $1 \pm \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}}$ son las curvas envolventes de la respuesta transitoria para una entrada escalón unitario [12]

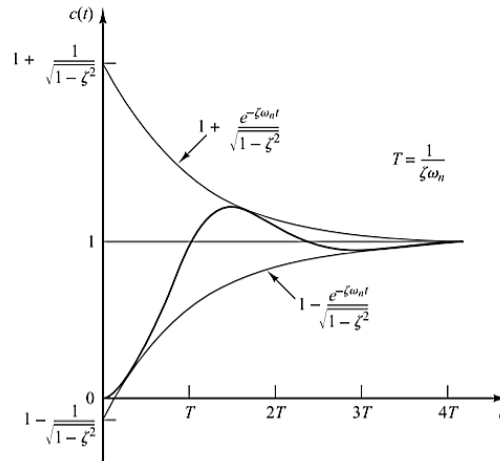
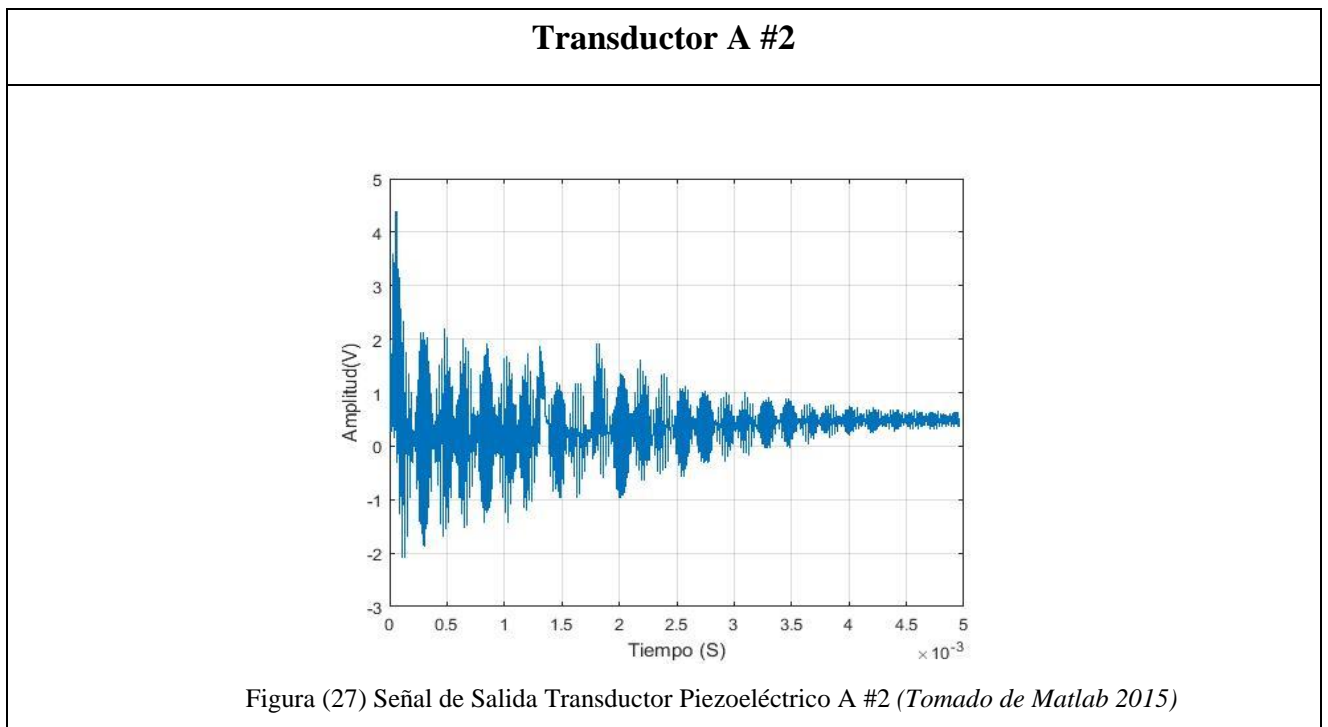


Figura (24) Par de curvas envolventes para la curva de respuesta a escalón unitario

5. Gráficas de las pruebas experimentales con los otros transductores

Tabla 7: Gráficas de las pruebas del transductor A #2



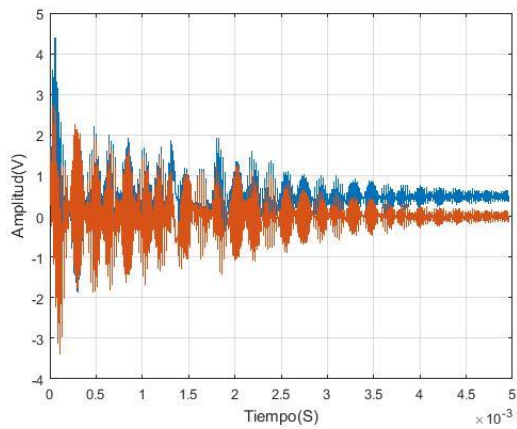


Figura (28) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)

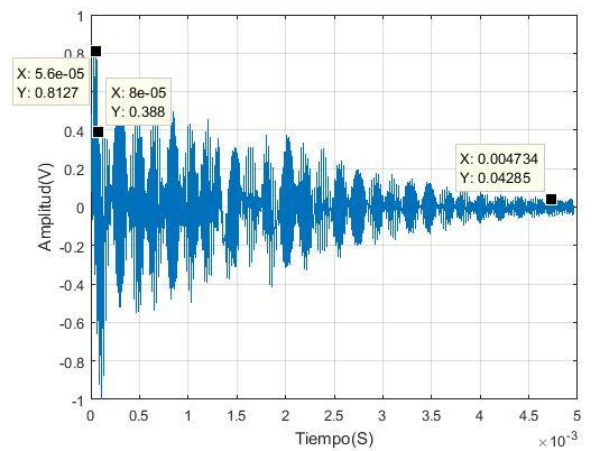


Figura (29) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)

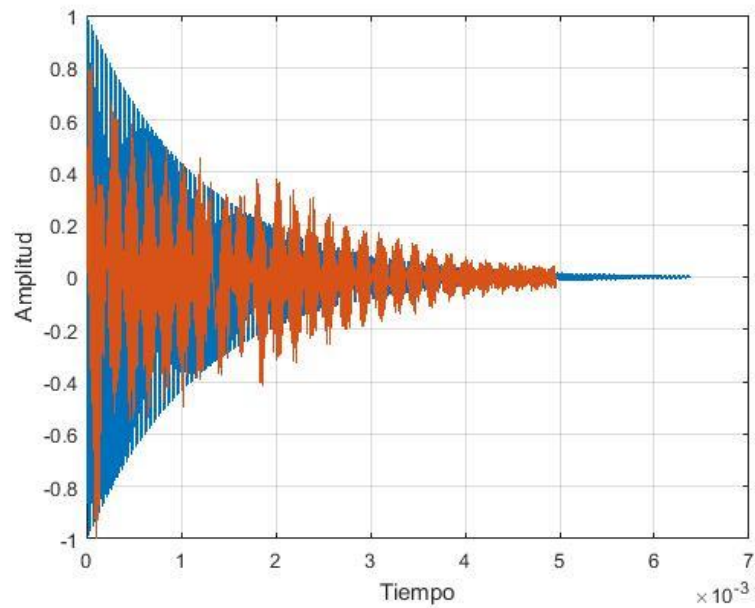


Figura (30) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)

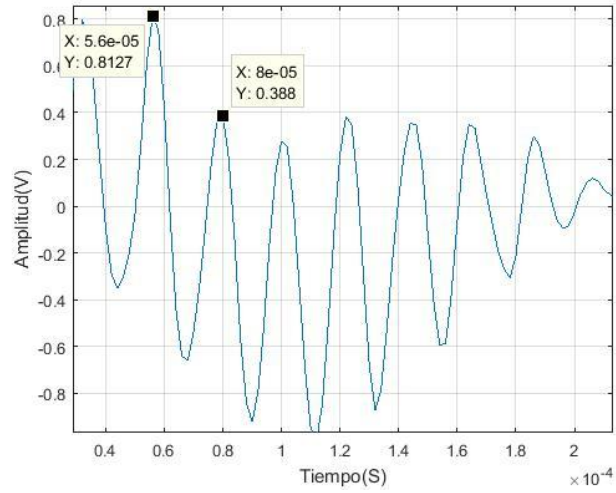


Figura (31) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)

Tabla 8: Gráficas de las pruebas del transductor A #3

Transductor A #3

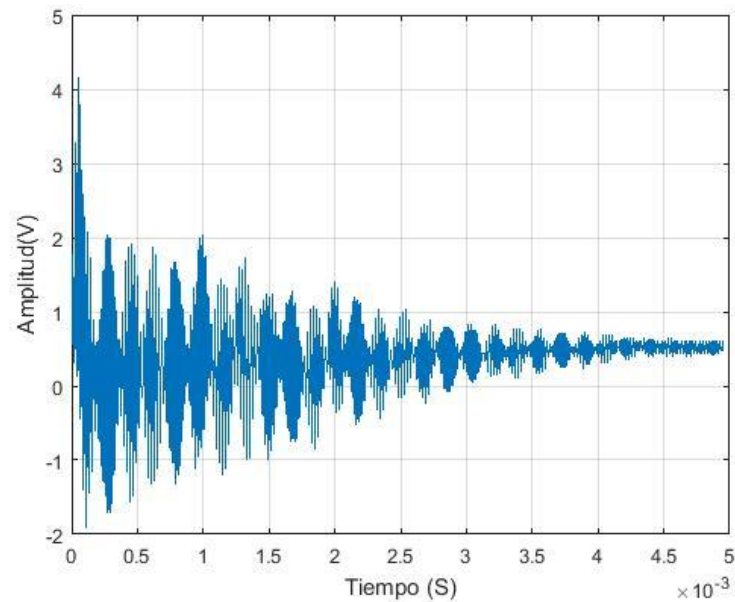


Figura (32) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)

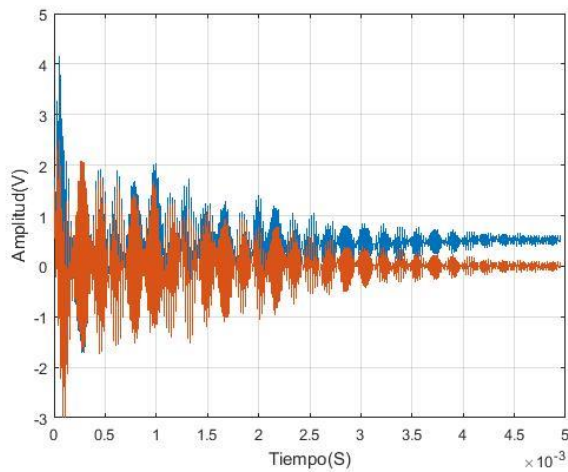


Figura (33) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2
(Tomado de Matlab 2015)

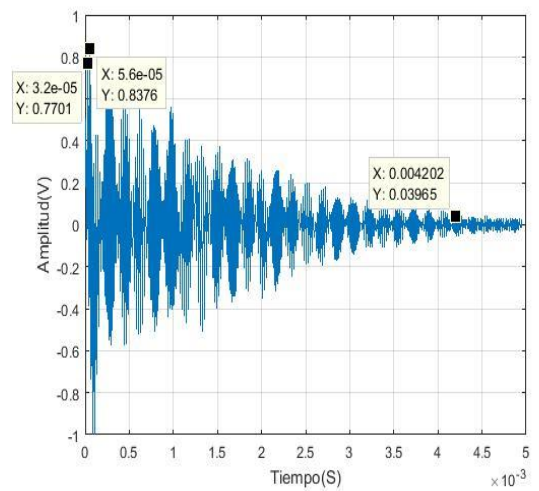


Figura (34) Señal de Salida Transductor
Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)

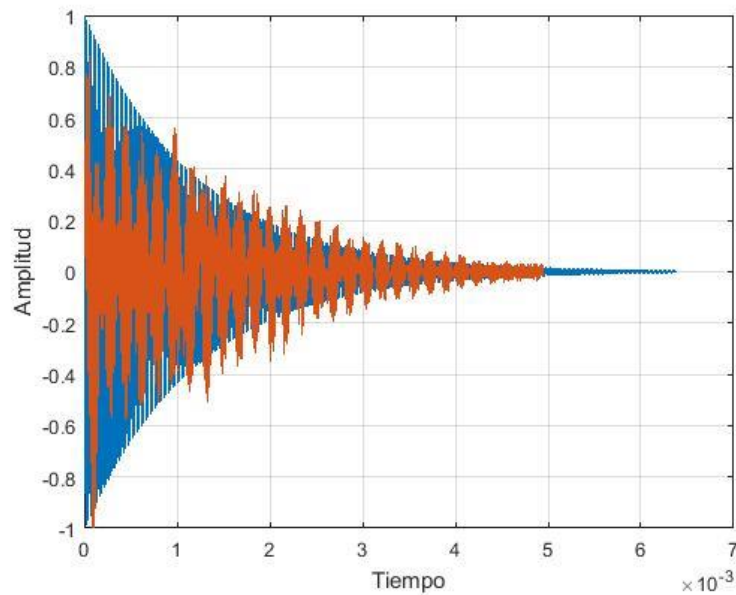


Figura (35) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)

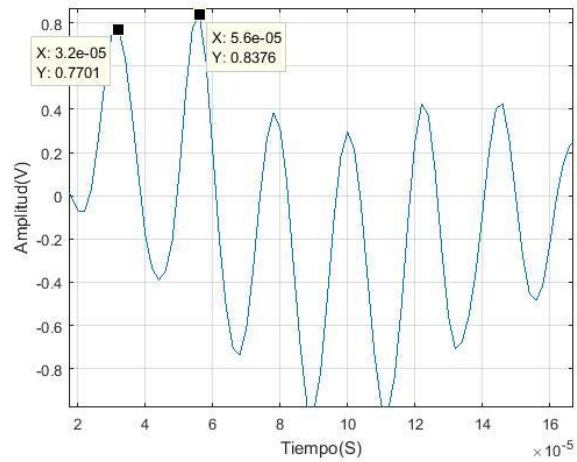


Figura (36) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)

Tabla 9: Gráficas de las pruebas del transductor B #1

Transductor B #1

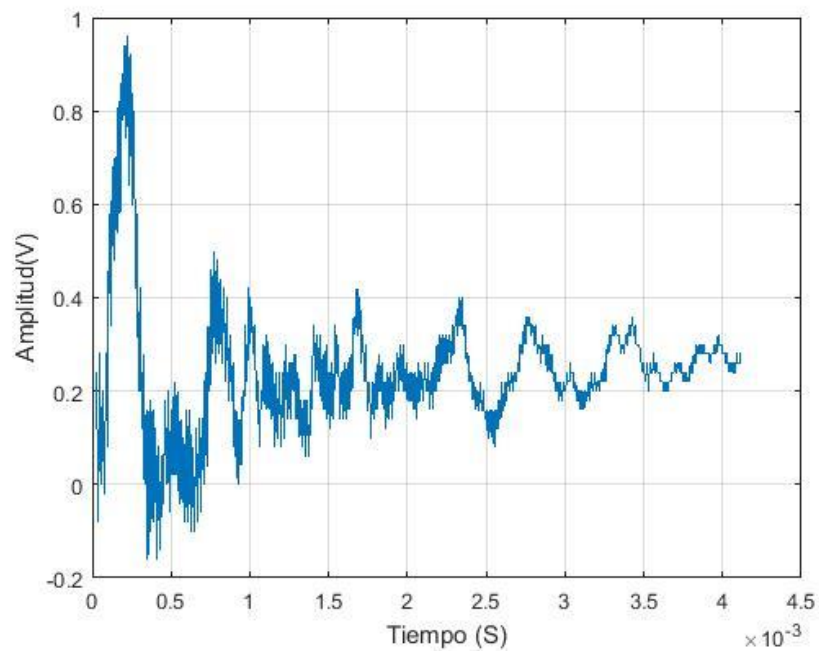
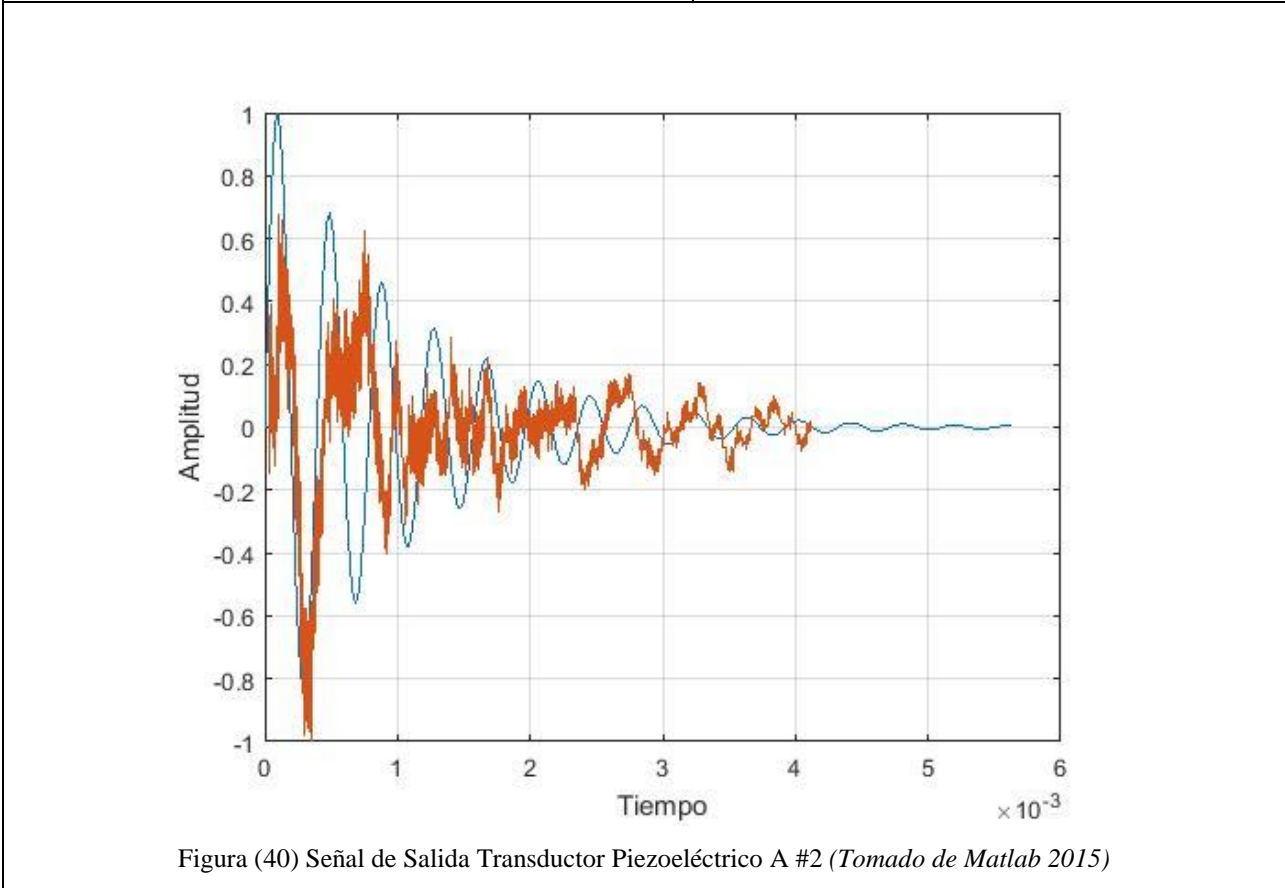
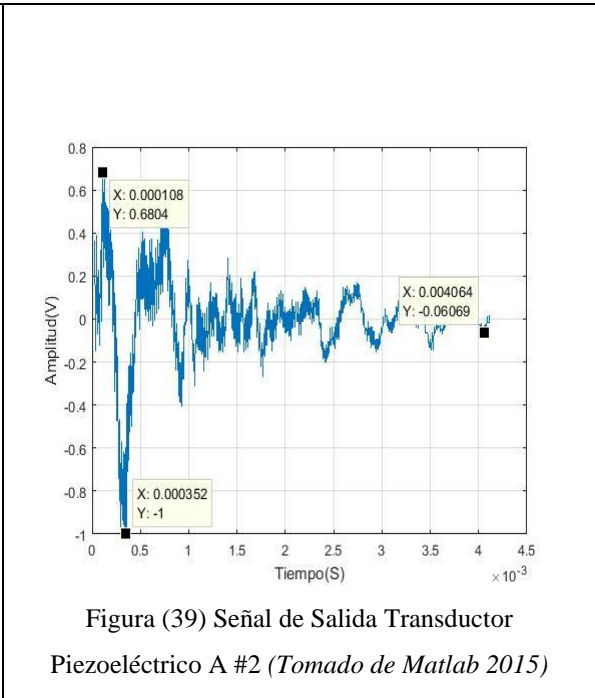
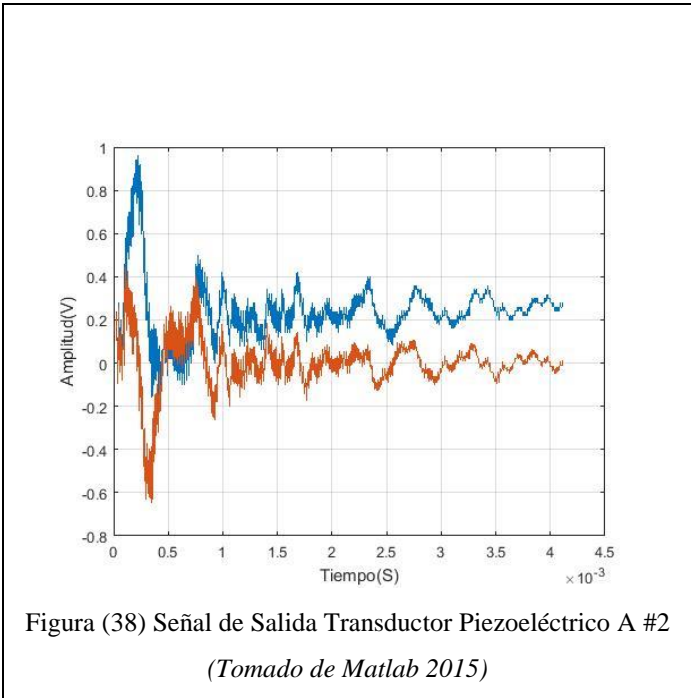


Figura (37) Señal de Salida Transductor Piezoeléctrico A #2 (Tomado de Matlab 2015)





Bibliografía

- [1] Endesa, «Endesa educa,» Endesa Energy Toolbar, 2016. [En línea]. Available: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/i.-la-energia-y-los-recursos-energeticos. [Último acceso: 14 Agosto 2017].
- [2] Roberto, «¿QUÉ ES LA ENERGÍA ELÉCTRICA?,» twenergy, 2012.
- [3] A. d. Queréntano, «El efecto Piezoeléctrico y sus aplicaciones tecnológicas,» AM de Queréntano, 25 Junio 2013. [En línea]. Available: <http://amqueretaro.com/opinion/2013/06/25/el-efecto-piezoelctrico-y-sus-aplicaciones-tecnologicas>. [Último acceso: 27 Agosto 2017].
- [4] L. d. F. d. M. D. y. Ópticos, «Caracterización de Materiales Piezoeléctricos,» Universitat de Barcelona, Barcelona, España.
- [5] B. Jiménez, «Materiales piezoeléctricos: formas de presentación, ventajas y desventajas en las aplicaciones,» Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Madrid, 1995.
- [6] E. R. Trelles., Temas de Electricidad y Magnetismo, EUDEBRA.
- [7] N. K. C. G. DIEGO ARMANDO TAMAYO ZAPATA, «EL USO DE PIEZOELÉCTRICOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA SOSTENIBLE COMO PROYECTO PILOTO EN UN PERFIL VIAL DE BOGOTÁ,» Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2017.
- [8] C. F. Q. Salinas, «Modelo básico de un recolector de energía por vibraciones,» de *Comparación de Modelos para Generación de Electricidad por Vigas Piezoeléctricas Enfocado a Pequeños Dispositivos Electrónicos*, Santiago de Chile, Universidad de Chile, 2015, p. 7.
- [9] A. R. Aguilera, «Capítulo 3. Modelos para materiales piezoeléctricos,» de *Cargador de dispositivos móviles basado en piezoeléctricos*, Puebla, México, Universidad de las Américas Puebla, 2014.
- [10] «Circuito Electrónico Equivalente de un Oscilador de Cristal,» 31 Marzo 2015. [En línea]. Available: http://www.manuelvillasur.com/2015/03/circuito-electronico-equivalente-de-un_31.html. [Último acceso: 25 Febrero 2019].
- [11] D. M. Centeno, «Conceptos Electrónicos en la Medida de la Aceleración y la Vibración,» Escuela Politécnica de Sevilla, Sevilla, España, 2010.
- [12] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, Pearson, 2010.
- [13] J. M. R. S., SISTEMAS DE CONTROL, Santiago de Cali: UNIVERSIDAD DEL VALLE COLCIENCIAS, Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2014.
- [14] K. Academy, «Respuesta Natural y Forzada, La respuesta natural de un circuito RLC,» 2019. [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit->



- analysis-topic/ee-natural-and-forced-response/a/ee-rlc-natural-response-variations. [Último acceso: 25 Febrero 2019].
- [15] WordPress, «Los Combustibles Fósiles,» WordPress, Noviembre 2008. [En línea]. Available: <https://villalbafosil.wordpress.com/aplicaciones-de-los-combustibles-fosiles/>. [Último acceso: 27 Agosto 2017].
- [16] Américafotovoltaica, «La Guía Solar,» Américafotovoltaica, [En línea]. Available: <http://www.laguiasolar.com/impacto-ambiental-la-energia-convencionales/>. [Último acceso: 2 Octubre 2017].
- [17] Defensoría del Pueblo Colombia, «Defensoría advierte preocupante impacto ambiental de las hidroeléctricas en Colombia,» Defensoría del Pueblo Colombia, 18 Agosto 2016. [En línea]. Available: <http://www.defensoria.gov.co/es/nube/noticias/5613/Defensor%C3%ADa-advierte-preocupante-impacto-ambiental-de-las-hidroel%C3%A9ctricas-en-Colombia.htm>. [Último acceso: 2 Octubre 2017].
- [18] Q.-I. W. Yi-hua Huang, «Detailed Analysis and Optimized Design of Piezoelectric Energy Harvesting Circuit,» School of Information Science and Technology, Guangzhou, China, 2013.
- [19] A. Othman, «Modeling of Piezoelectric Energy Harvesting System Embedded in Soldier's Boot Using Matlab/Simulink,» Czech Technical University in Prague, Praga, República Checa, 2017.
- [20] S. B.-Y. Natan Krihely, «Piezoelectric Harvesting Circuit with Extended Input Voltage Range,» IEEE Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel, 2010.
- [21] D. C. H. Y. M. H. Xiaochen Xu, «Application of Piezoelectric Transducer in Energy Harvesting in Pavement,» Chinese Society of Pavement Engineering, International Journal of Pavement Research and Technology, China, 2017.
- [22] H. W. G. Y. A. S. A. M. Abbas Jasim, «Optimized design of layered bridge transducer for piezoelectric energy harvesting from roadway,» ELSEVIER, Energy, Baghdad, Iraq., New Jersey, USA, 2017.
- [23] Y. T. R. P. Y. D. Y. M. U. Hidemi Mutsuda, «A Painting Type of Flexible Piezoelectric Device for Ocen Energyharvesting,» CrossMark, ELSEVIER, Hiroshima, Japón, 2017.
- [24] N. V. A. C. Q. W. J.X. Tao, «Energy Harvesting from Wind by a Piezoelectric Harvester,» CrossMark, Hong Kong, China, 2016.
- [25] M. H. P. F. S. H. Y. Amini, «Piezoelectric energy harvesting from vibrations of a beam subjected to multi-moving loads,» CrossMark, ElSevier, Irán, 2017.
- [26] Y. H. X. Y. M. Z. Mupeng Zheng, «The Structural Origin of Enhanced Energy Harvesting Performance in Piezoelectric Perovskite,» Journal of the European Ceramic Society, Beijing, China, 2017.



- [27] M. Y. M. G. M. E. Adnan Mohamed Elhalwagy, «Feasibility Study for Using Piezoelectric Energy Harvesting Floor in Buildings Interior Spaces,» *Energy Procedia*, Cairo, Egipto, 2017.
- [28] EcuRed, «EcuRed,» [En línea]. Available: www.ecured.cu/Cerámica_piezoeléctrica. [Último acceso: 23 Octubre 2017].
- [29] N. M. N. M. M. A. A. Nik Ahmad Kamil Zainal Abidin, «Analysis of voltage multiplier circuit simulation for rain energy harvesting using circular piezoelectric,» *ELSEVIER, ScienceDirect, CrossMark*, Perlis, Malaysia, 2017.
- [30] A. Q. L. Q. W. N.V. Viet, «An octo-generator for energy harvesting based on the piezoelectric effect,» *Applied Ocean Research*, Abu Dhabi, Hong Kong, 2017.
- [31] A. T. P. T. S.D. Psoma, «A practical application of energy harvesting based on piezoelectric technology for charging portable electronic devices,» *materialstoday ROCEEDINGS*, Kozani, Greece, 2017.
- [32] R. Gonzalez, «Twenergy,» 12 Enero 2012. [En línea]. Available: <https://twenergy.com/a/emisiones-de-co2-458>. [Último acceso: 29 Octubre 2017].
- [33] P. Correa, «En 20 años Colombia aumentó en un 15% sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero,» *El ESPECTADOR*, 3 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/20-anos-colombia-aumento-un-15-sus-emisiones-de-gases-d-articulo-663749>. [Último acceso: 29 Octubre 2017].
- [34] D. A. Christensen, *Ultrasonic bioinstrumentation*, New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [35] Haines, «SlideServe - Sensores y Generadores,» [En línea]. Available: <https://www.slideserve.com/haines/sensores-y-actuadores>. [Último acceso: 1 Febrero 2019].